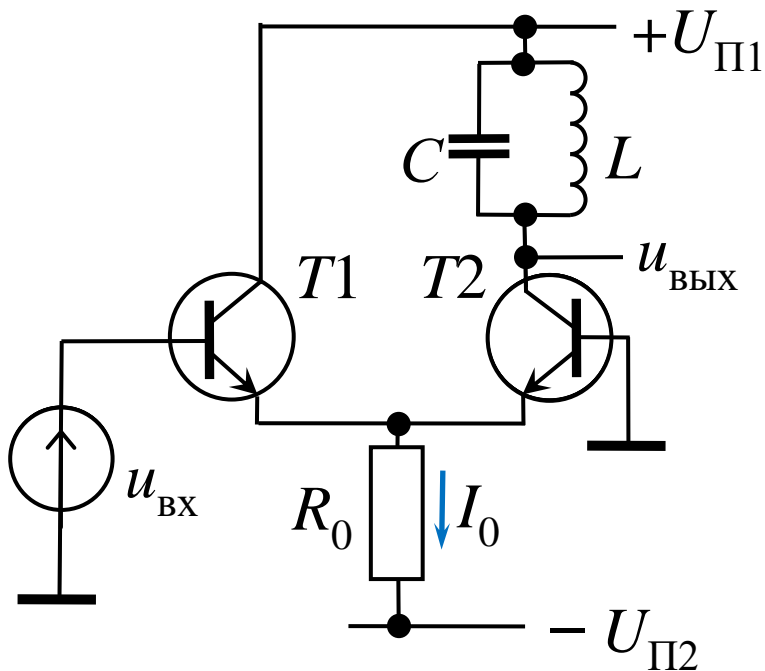


Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя

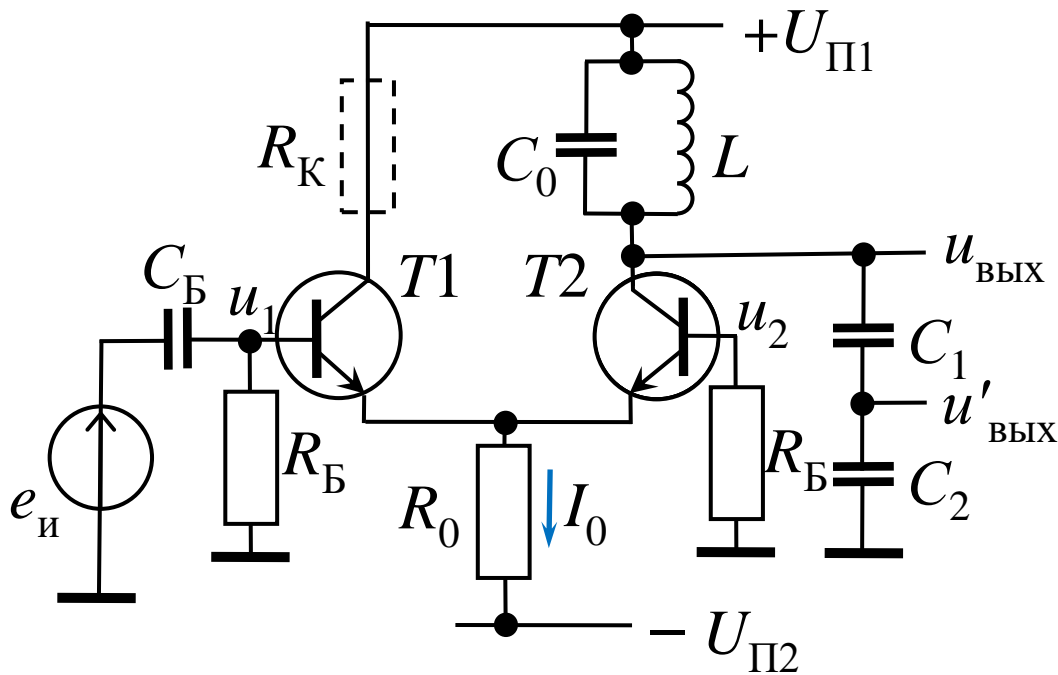


$$\dot{K} = \dot{K}_{\text{диф}} / 2 = S \dot{Z}_{LC} / 2.$$

$$\text{При } \omega = \omega_0 \quad K = SQ\rho / 2.$$

$$R_{\text{ВХ}} = 2h_{11\varepsilon} = 2(r_{\varepsilon 1\varepsilon} + r_{\varepsilon 1\varepsilon}).$$

Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя



$$u_{\text{ВХ}} = u_1 - u_2$$

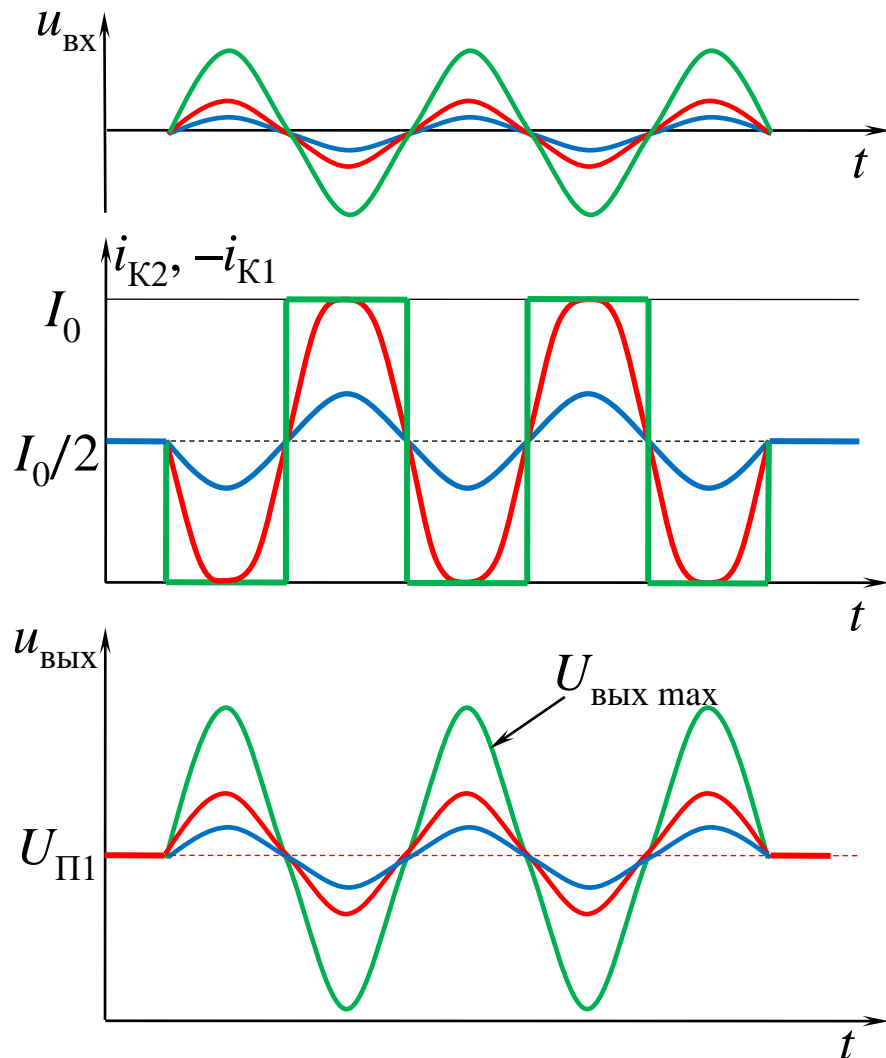
$$K_u = u_{\text{ВЫХ}} / u_{\text{ВХ}} = SR_{\text{ЭКВ}} / 2$$

$$u'_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ}} C_1 / (C_1 + C_2)$$

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$$

$$C = C_0 + C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя



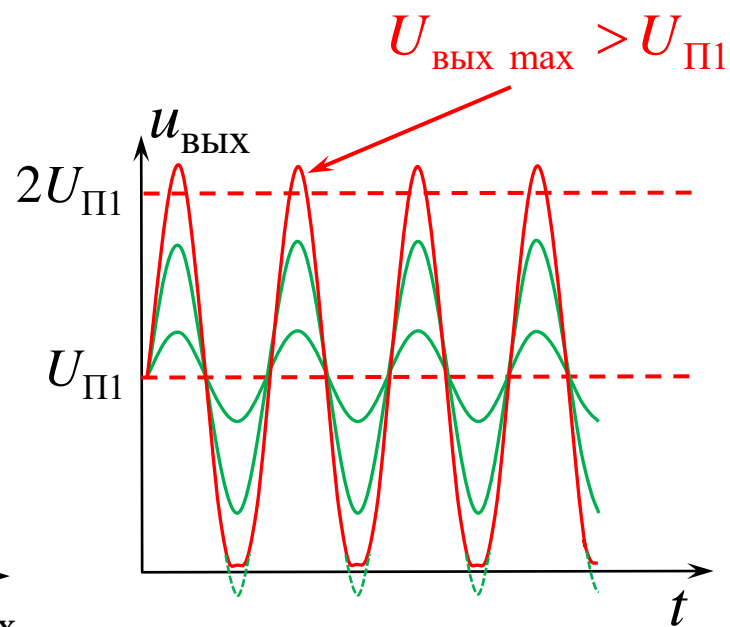
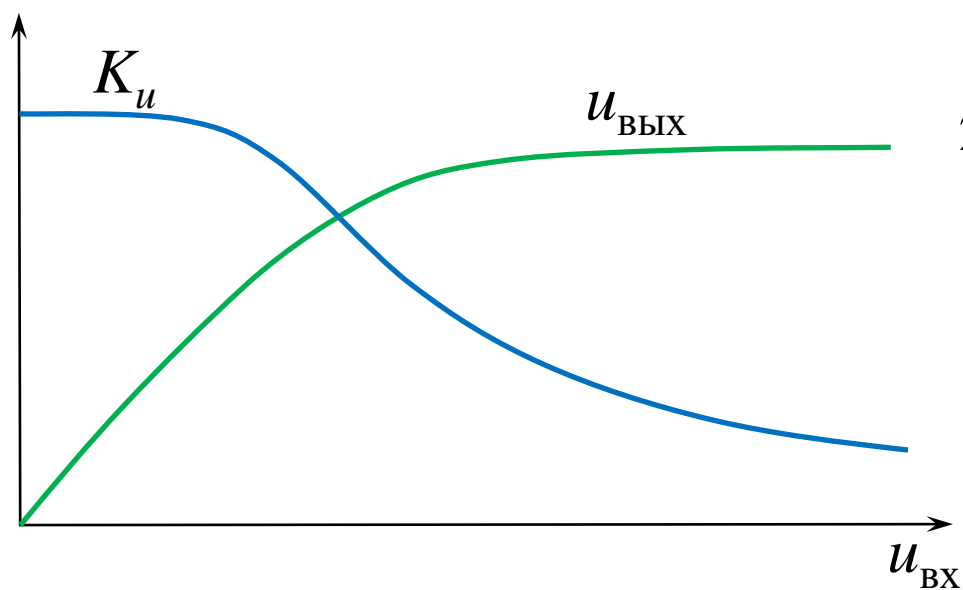
$$i_{K2} = I_0/2 + I_1 \cos(\omega_0 t) + I_3 \cos(3\omega_0 t) + \dots$$

$$I_1 = (4/\pi) \cdot I_0/2 = 2I_0/\pi$$

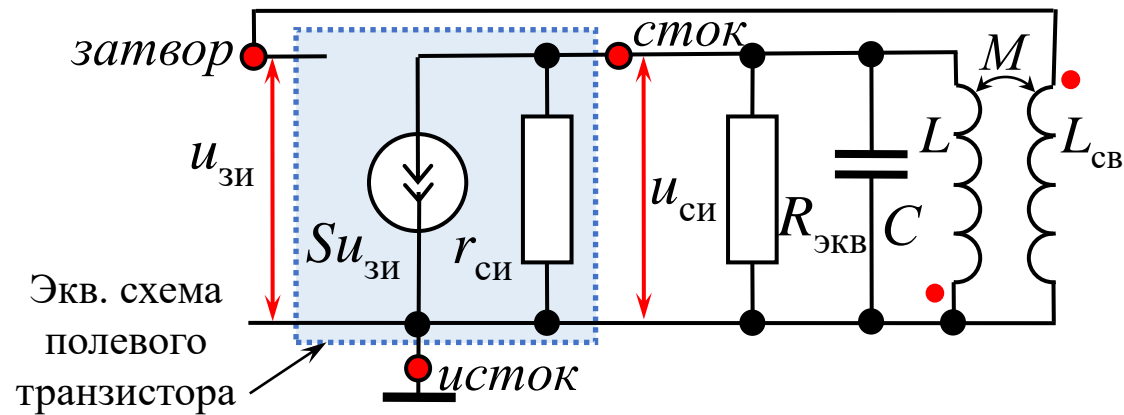
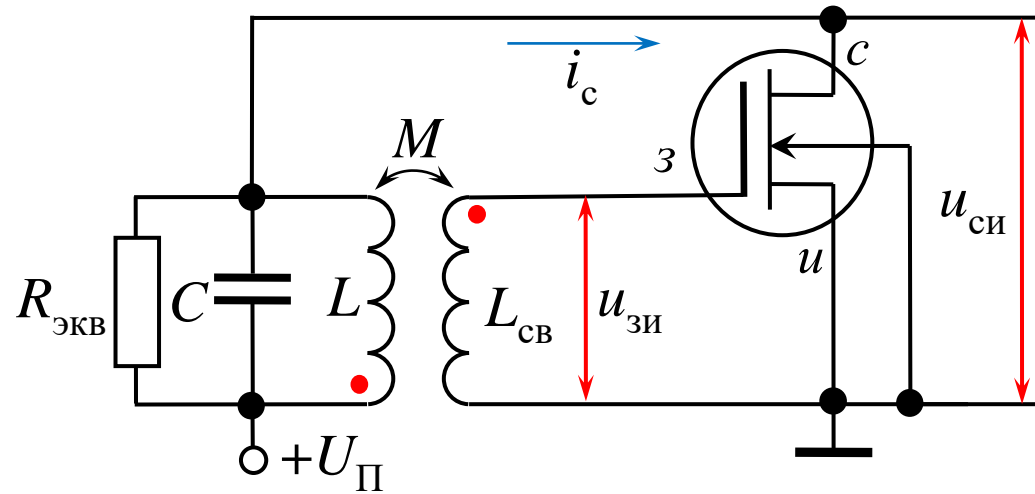
$$U_{ВЫХ \max} = \frac{2I_0}{\pi} R_{ЭКВ} = \frac{2I_0}{\pi} \rho Q$$

$$U_{ВЫХ \max} < U_{П1}$$

Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя



LC-ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ



Условие самовозбуждения генератора

$$K(j\omega) = \frac{u_{\text{си}}}{u_{\text{зи}}} = -S / \left[\frac{1}{r_{\text{си}}} + \frac{1}{R_{\text{эКВ}}} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right]$$

$$\beta(j\omega) = -M/L,$$

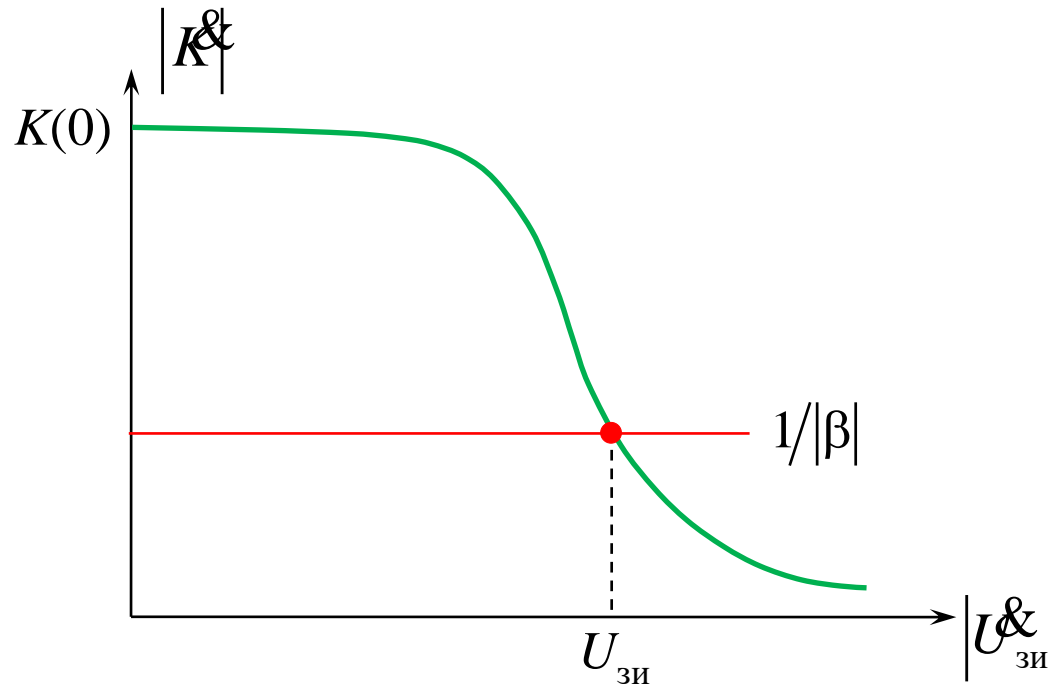
$$K(j\omega)\beta(j\omega) = \frac{SM}{L} / \left[\frac{1}{r_{\text{си}}} + \frac{1}{R_{\text{эКВ}}} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right].$$

$$\left. \begin{array}{l} \arg K(j\omega_0) + \arg \beta(j\omega_0) = 0, \\ \beta K_0 > 1, \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{УСЛОВИЯ} \\ \text{ВОЗНИКНОВЕНИЯ} \\ \text{КОЛЕБАНИЙ} \end{array}$$

$$K_0 = K(j\omega) \Big|_{\omega=\omega_0} = -S / \left(\frac{1}{r_{\text{си}}} + \frac{1}{R_{\text{эКВ}}} \right) = -\frac{SR_{\text{эКВ}}}{1 + R_{\text{эКВ}}/r_{\text{си}}}$$

$$\frac{SR_{\text{эКВ}}}{1 + R_{\text{эКВ}}/r_{\text{си}}} \cdot \frac{M}{L} > 1$$

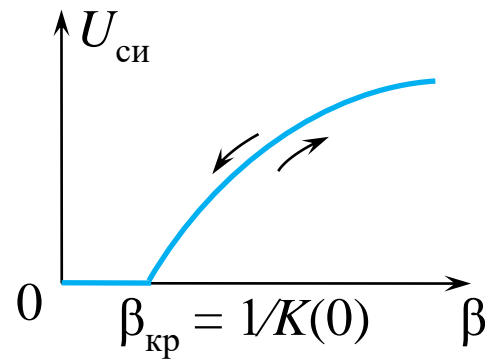
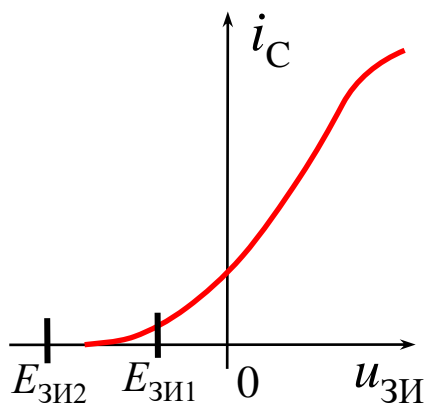
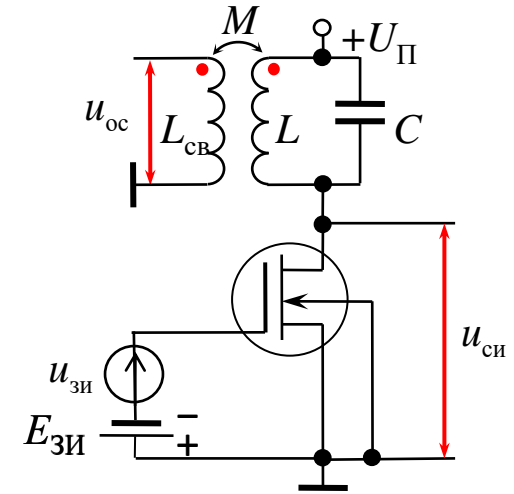
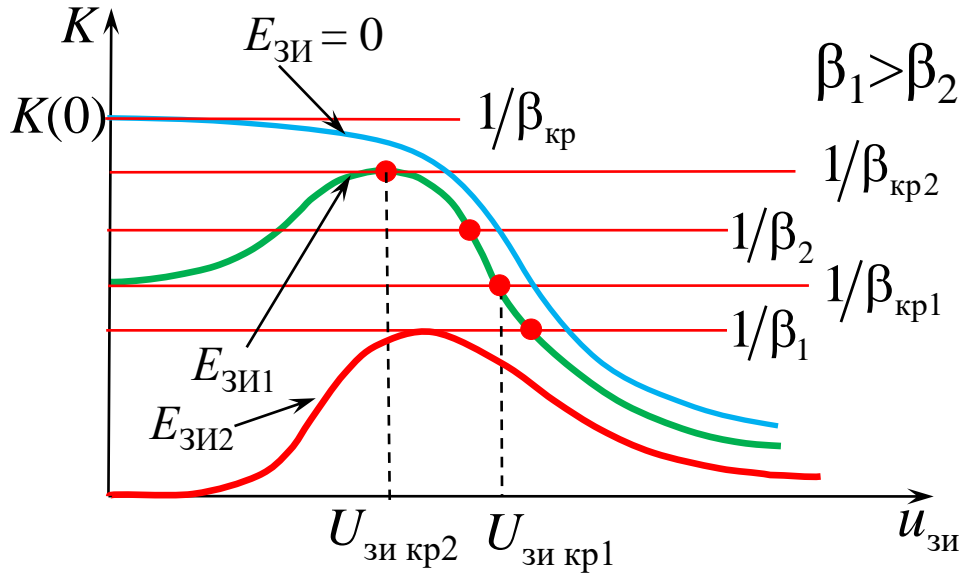
Условия существования стационарных колебаний в генераторе



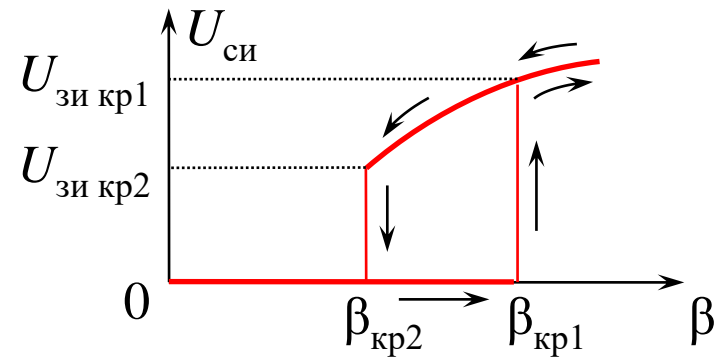
Условия существования
стационарных колебаний

$$\left\{ \begin{array}{ll} \arg K + \arg \beta = 2\pi n & \text{Баланс фаз} \\ |K| \cdot |\beta| = 1 & \text{Баланс амплитуд} \end{array} \right.$$

Мягкий и жесткий режимы возникновения колебаний

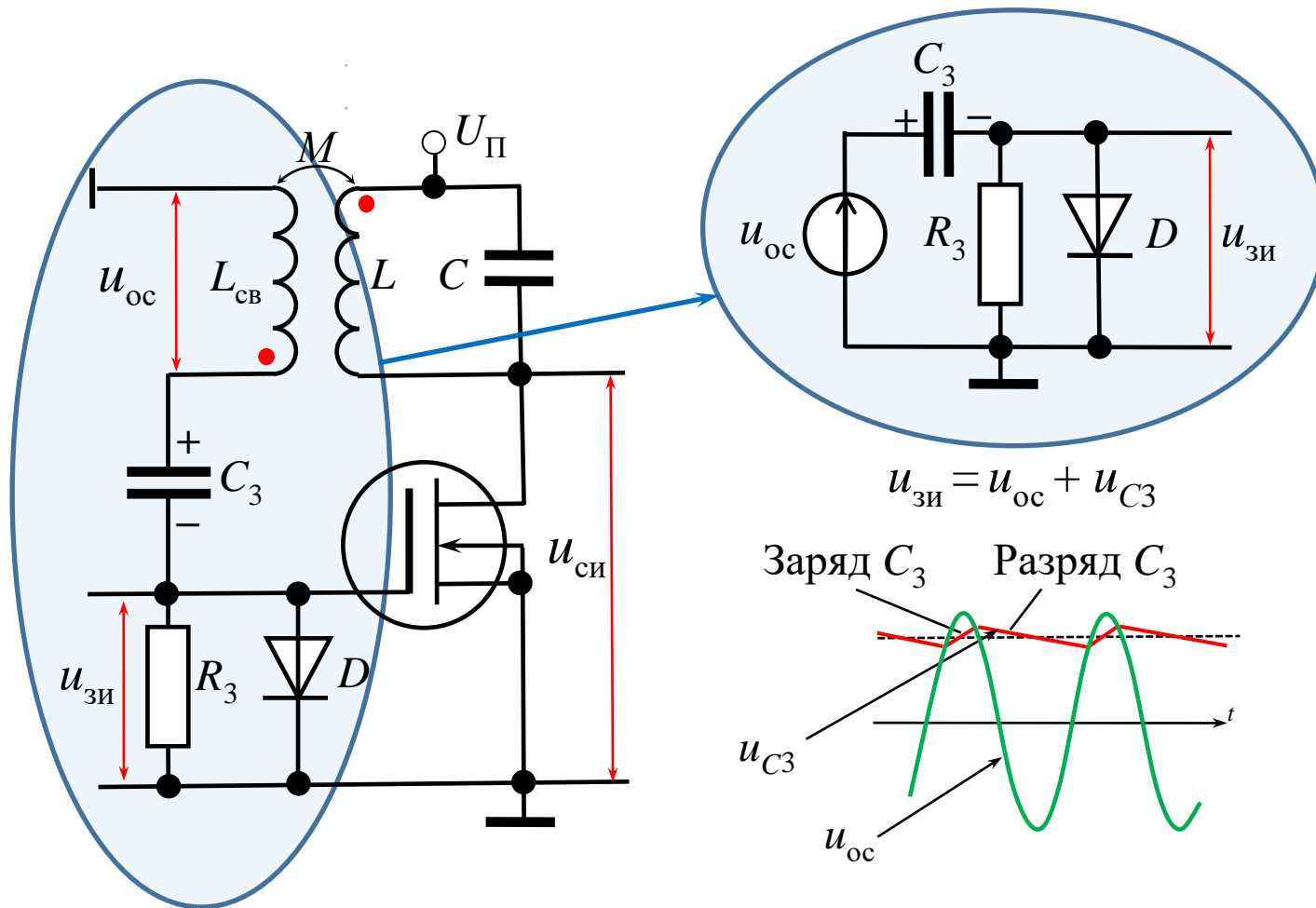


Мягкий режим
возбуждения колебаний

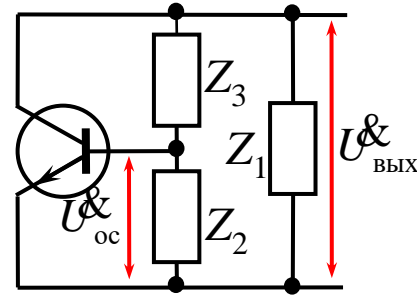
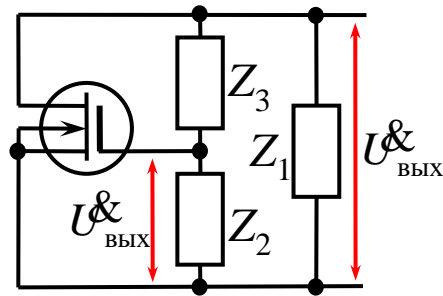


Жесткий режим
возбуждения колебаний

Автоматическое смещение в генераторе



Трехточечные автогенераторы



$$Z_i = R_i + jX_i$$

Условие резонанса – $X_1 + X_2 + X_3 = 0$

$$\beta = \frac{U_{oc}}{U_{ВЫХ}} = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \approx \frac{X_2}{X_2 + X_3} = -\frac{X_2}{X_1}$$

$$\arg \beta = \arg(-X_2/X_1) = \pi + \arg(X_2/X_1)$$

$$\arg K_1 + \arg \beta = \pi + \pi + \arg(X_2/X_1)$$

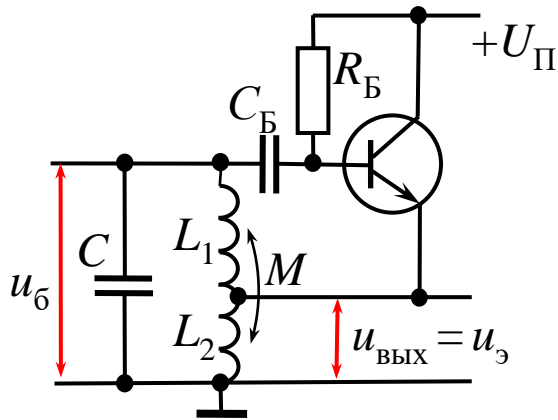
$$X_1 > 0, X_2 > 0, X_3 < 0$$

Индуктивный трехточечный генератор (генератор Хартли)

$$X_1 < 0, X_2 < 0, X_3 > 0$$

Емкостной трехточечный генератор (генератор Колпитца)

Индуктивный трехточечный генератор



$$\beta = \frac{u_6}{u_3} = \frac{L}{L_2 + M} = \frac{L_1 + L_2 + 2M}{L_2 + M}$$

$$\text{при } k_{\text{св}} = M / \sqrt{L_1 L_2} = 1$$

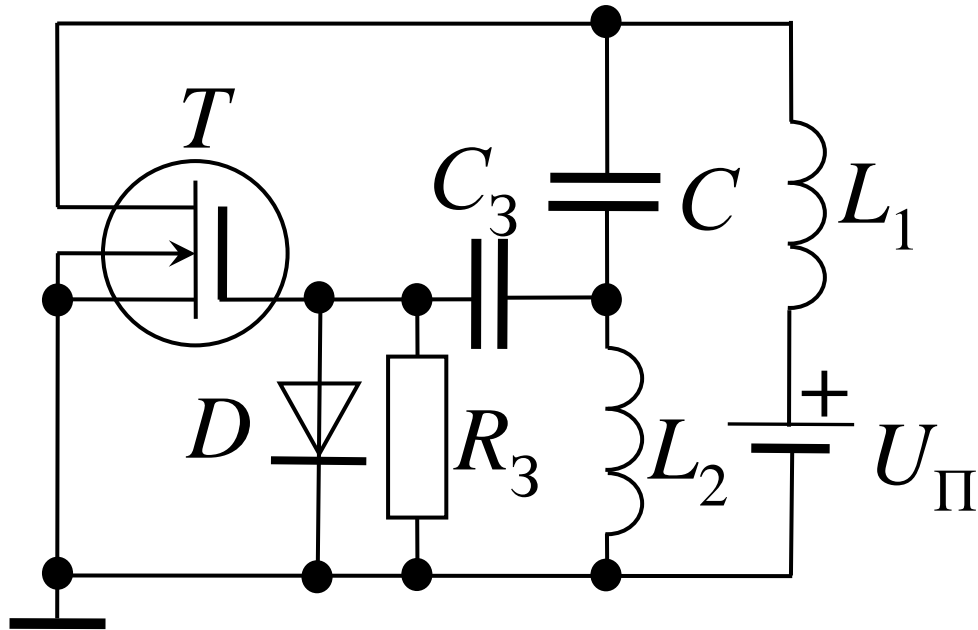
$$\beta = \frac{L_1 + L_2 + 2\sqrt{L_1 L_2}}{L_2 + \sqrt{L_1 L_2}} = \frac{(\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2})^2}{L_2 + \sqrt{L_1 L_2}} > 1$$

$$L_i = \alpha w_i^2 \quad \beta = \frac{(w_1 + w_2)^2}{w_2^2 + w_1 w_2} = \frac{w_1 + w_2}{w_2}$$

$$K = \frac{u_3}{u_6} = \frac{R_{\text{н}}}{r_3 + R_{\text{н}}} = \frac{R_{\text{эКВ}}}{r_3 + R_{\text{эКВ}}} < 1$$

$$R_{\text{эКВ}} = \left(R_{\text{эКВ0}} \parallel r_3 (1 + h_{213}) \cdot \frac{\beta^2}{(\beta - 1)^2} \right) / \beta^2,$$

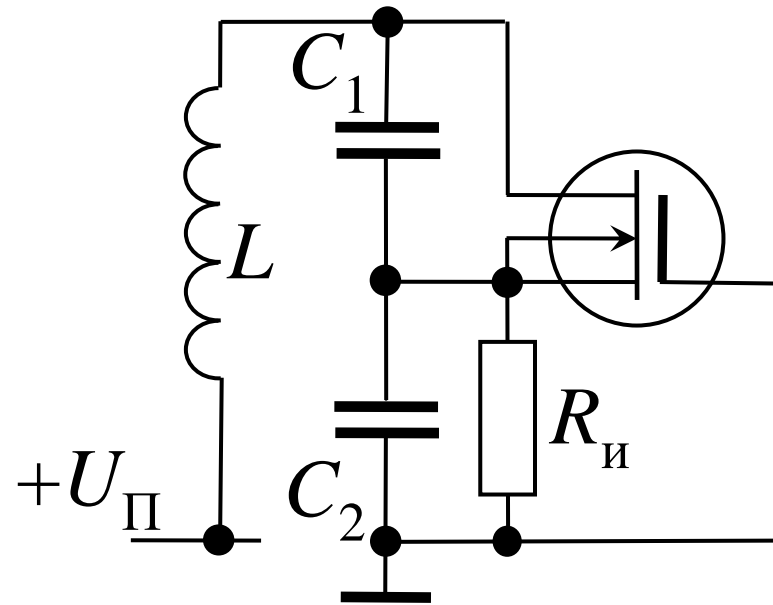
Индуктивный трехточечный генератор на полевом транзисторе



$$\beta = -\frac{X_2}{X_1} = -\frac{L_2}{L_1} \quad R'_{\text{ЭКВ}} = p^2 R_{\text{ЭКВ}} \quad p = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$$

$$\frac{Sp^2 R_{\text{ЭКВ}}}{1 + p^2 R_{\text{ЭКВ}} / r_{\text{си}}} \cdot \beta > 1$$

Емкостной трехточечный генератор

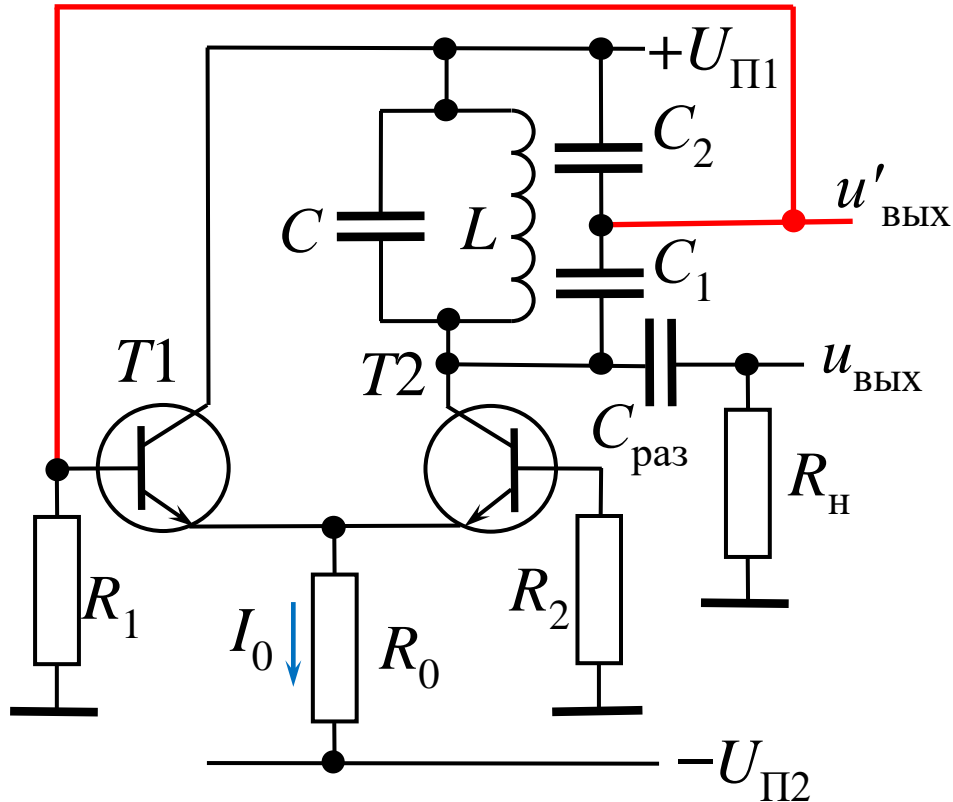


$$\beta = \frac{Z_{C2}}{Z_{C1} + Z_{C2}} = \frac{C_1}{C_2 + C_1} \quad C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

$$p = Z_{C1} / Z_C = C / C_1 = C_2 / (C_1 + C_2)$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ЭКВ0}} \left\| \frac{R_{\text{И}} \| 1/S}{\beta^2} \right. \quad \frac{Sp^2 R_{\text{ЭКВ}}}{1 + p^2 R_{\text{ЭКВ}} / r_{\text{СИ}}} \cdot \beta > 1$$

Генератор с использованием дифференциального усилителя



$$I_0 \approx U_{П2} / R_0, \quad S = I_0 / 2U_T$$

$$K = SR_{ЭКВ} / 2 = I_0 R_{ЭКВ} / 4U_T$$

$$R_{ЭКВ} = R_{ЭКВ0} \parallel R_H \parallel (R_{ВХ} / \beta^2)$$

$$R_{ВХ} = R_1 \parallel 2h_{11э}$$

$$K' = u'_{ВЫХ} / u_{ВХ} = \beta K$$

$$\beta = \frac{C_1}{C_2 + C_1}$$

$$C_{\text{контура}} = C + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_2 + C_1}$$

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ

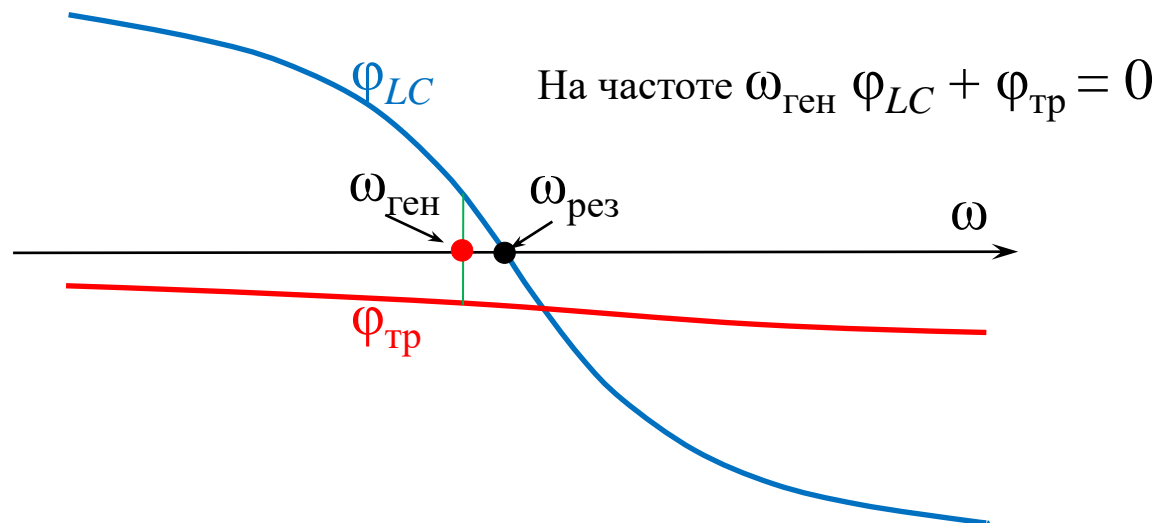
$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad \frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{рез}}} \approx -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta C}{C_0} \right)$$

Температурный коэффициент индуктивности (**ТКИ**) – относительное изменение индуктивности катушки при изменении ее температуры на 1 градус С.

Индуктивность проводника длиной l и диаметром d равна

$$L = 2 \cdot 10^{-3} l \left(\ln \frac{4l}{d} \right) \text{ мкГ}$$

Температурный коэффициент емкости (**ТКЕ**) – относительное изменение емкости конденсатора при изменении его температуры на 1 градус С.



Изменение частоты генерации, вызванное инерционностью транзистора

$$\varphi_{\text{тр}}(\omega_{\text{ген}}) + \varphi_{LC}(\omega_{\text{ген}}) = 0 \quad \begin{aligned} \varphi_{LC}(\omega) &= \arg(\dot{Z}) = -\arctg\left(2Q \frac{\omega - \omega_{\text{рез}}}{\omega_{\text{рез}}}\right) \\ \varphi_{\text{тр}}(\omega) &= \arctg(\omega \tau_{\text{тр}}) \end{aligned}$$

$$\arctg(\omega_{\text{ген}} \tau_{\text{тр}}) = \arctg\left(2Q \frac{\omega_{\text{ген}} - \omega_{\text{рез}}}{\omega_{\text{рез}}}\right) \quad \omega_{\text{ген}} = \frac{\omega_{\text{рез}}}{1 + (\tau_{\text{тр}} \omega_{\text{рез}} / 2Q)}$$

$$\Delta\omega = - \frac{\Delta\varphi}{\left|\partial\varphi / \partial\omega\right|_{\omega=\omega_{\text{рез}}}}$$

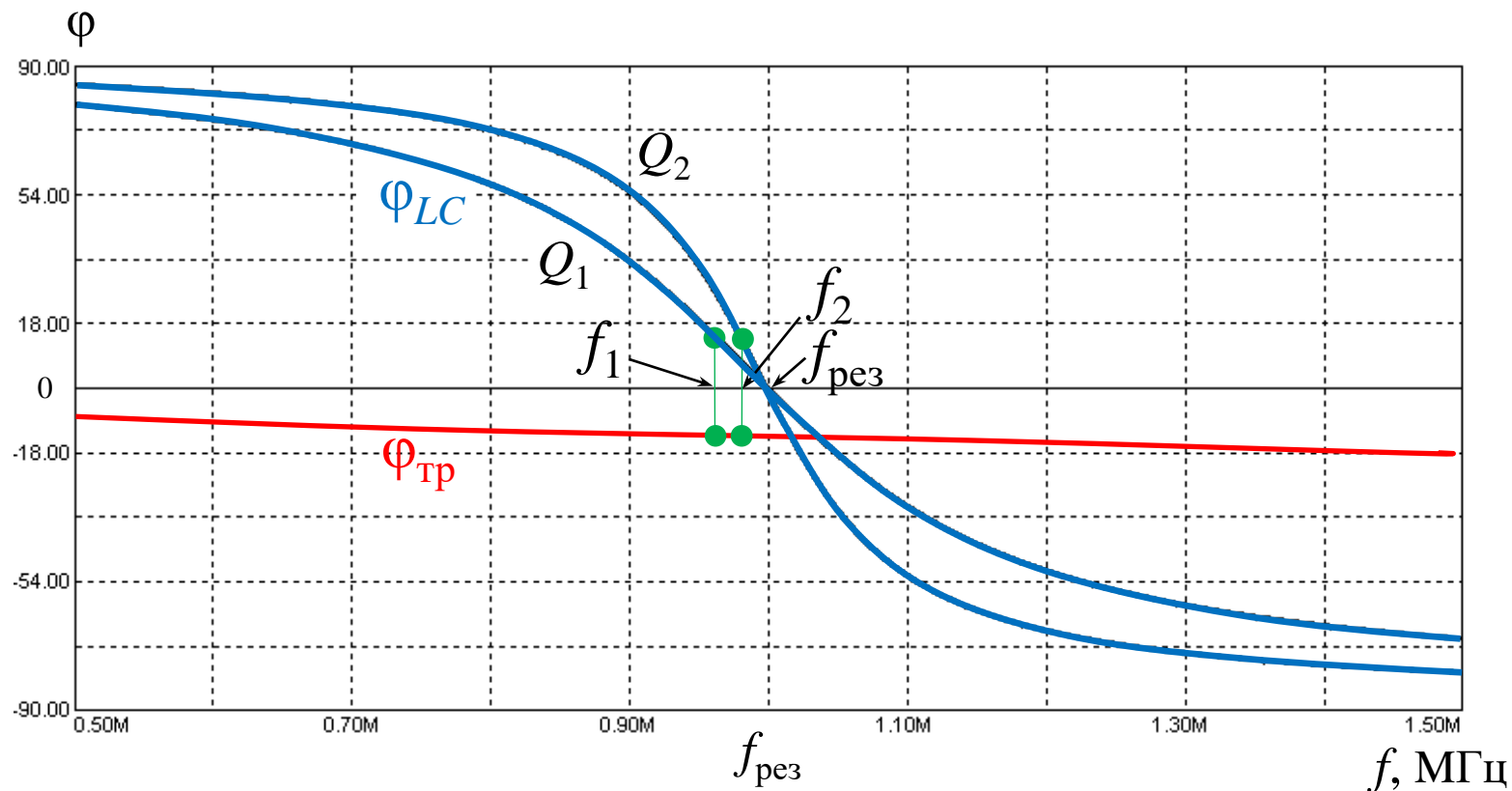
$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{рез}}} = - \frac{\Delta\varphi}{\omega_{\text{рез}} \cdot \left|\frac{\partial\varphi}{\partial\omega}\right|_{\omega=\omega_{\text{рез}}}}$$

$$\sigma_{\omega} = \omega_{\text{рез}} \cdot \left|\partial\varphi / \partial\omega\right|_{\omega=\omega_{\text{рез}}} \quad \text{фиксирующая способность контура по частоте}$$

$$\left|\partial\varphi / \partial\omega\right|_{\omega=\omega_{\text{рез}}} = 2Q / \omega_{\text{рез}},$$

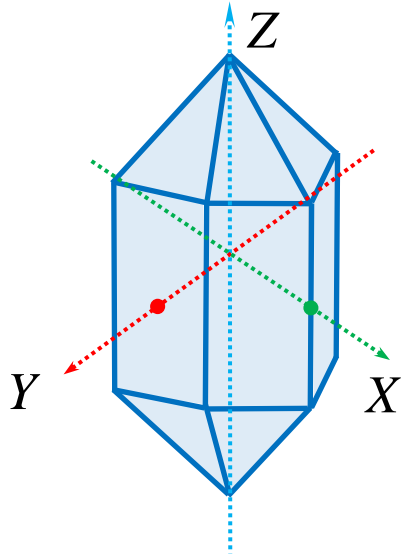
$$\sigma_{\omega} = 2Q.$$

Влияние добротности контура на изменение частоты генерации



$$Q_2 > Q_1$$

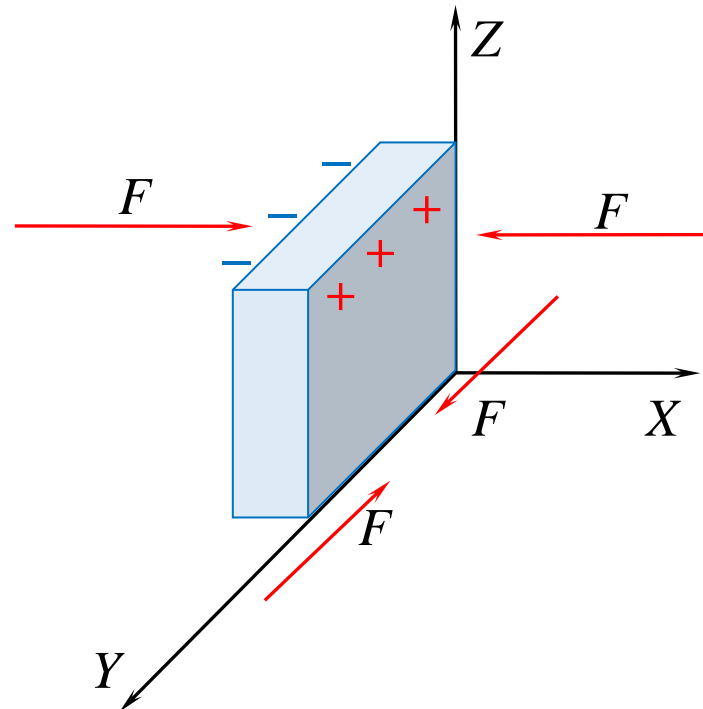
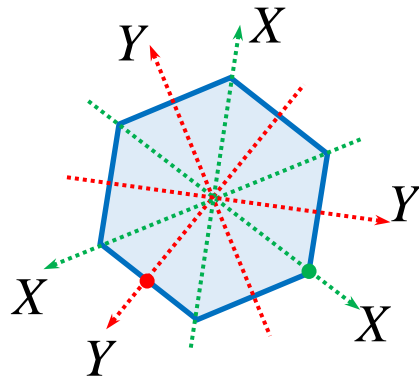
Кварцевый резонатор



Оптическая ось Z (вдоль призмы)

Электрические оси X , проходят через ребра призмы в плоскости, перпендикулярной оси Z

Механические оси Y , проходят перпендикулярно граням призмы.



Кварцевый резонатор

Вариант исполнения кварцевого резонатора.

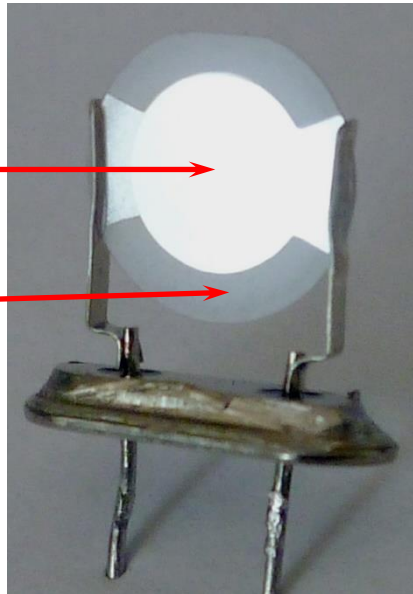
Круглая пластина с углом среза $+35^\circ$ по отношению к оси Z , толщиной $h \approx 1,66$ мм, с внешним диаметром $D \approx 14$ мм и диаметром центральных посеребренных электродов $d \approx 8$ мм; вид деформации – сдвиг по толщине.

Резонансная частота определяется соотношением

$$f_{\text{кв}} (\text{МГц}) \approx 1,66/h(\text{мм}) \text{ и составляет } 1 \text{ МГц}$$

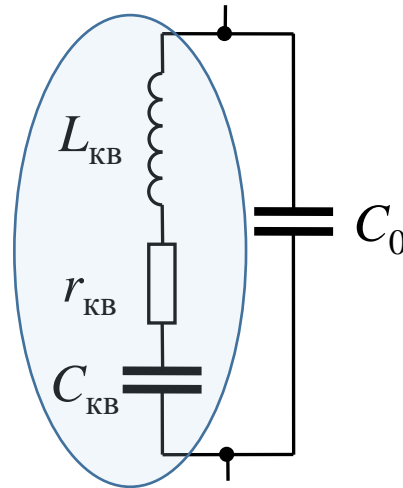
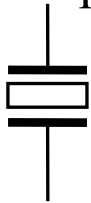
Напыление серебра
с двух сторон пластины

Пластина кварца

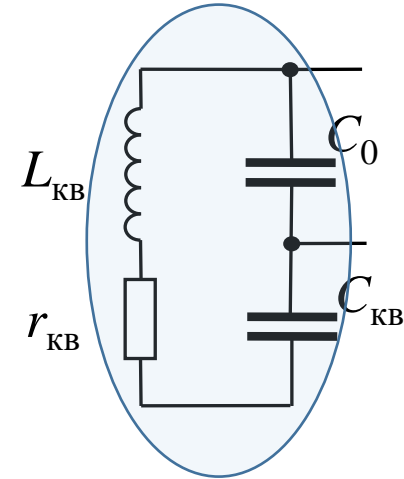


Эквивалентная электрическая схема кварца

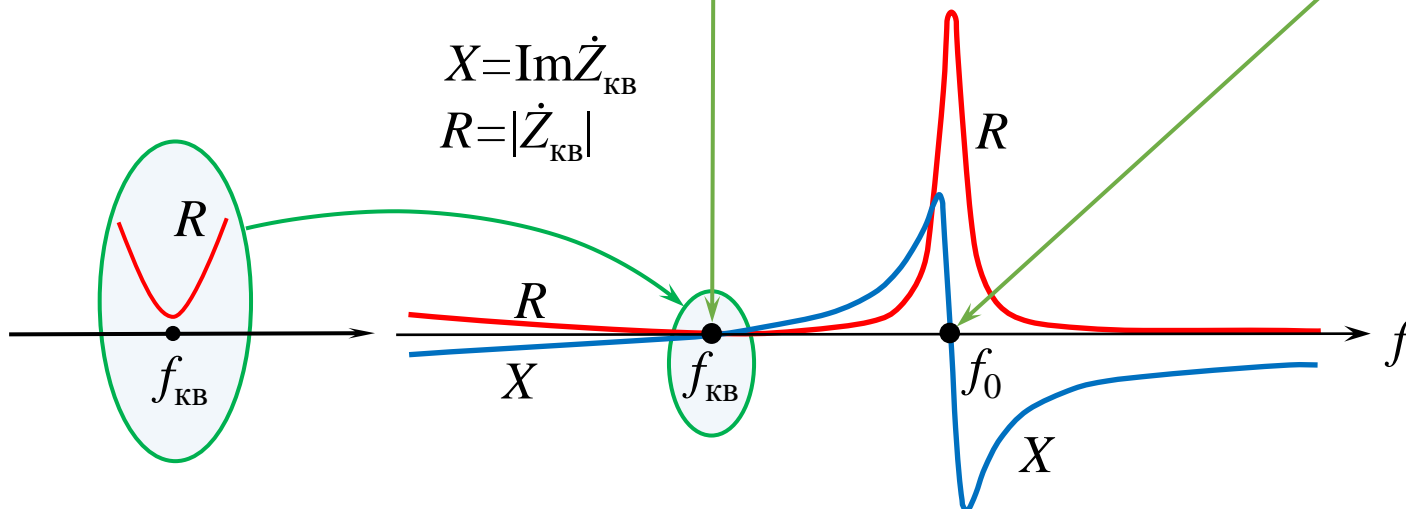
Условное
изображение
кварца



Эквивалентная схема
(последовательный резонанс)



Эквивалентная схема
(параллельный резонанс)



Параметры кварцевого резонатора

$$f_{\text{KB}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{KB}} C_{\text{KB}}}}. \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{KB}} \cdot C_{\text{KB}} C_0 / (C_{\text{KB}} + C_0)}} \approx f_{\text{KB}} \sqrt{1 + C_{\text{KB}} / C_0}.$$

Кварцевый резонатор $f_{\text{KB}} = 1 \text{ МГц}$

$$L_{\text{KB}} \approx 4.6 \text{ Гн} \quad C_{\text{KB}} \approx 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ пФ}$$

$$r_{\text{KB}} \approx 300 \text{ Ом}$$

$$\rho_{\text{KB}} = \sqrt{L_{\text{KB}} / C_{\text{KB}}} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ Ом}$$

$$Q_{\text{KB}} = \frac{\rho_{\text{KB}}}{r_{\text{KB}}} = 10^5$$

$$R_{\text{эKB}} = Q_{\text{KB}} \rho_{\text{KB}} = 3 \cdot 10^{12} \text{ Ом}$$

LC колебательный контур

$$L = 50 \text{ мкГн} \quad C = 510 \text{ пФ}$$

$$r = 3 \text{ Ом}$$

$$\rho_{LC} = \sqrt{L/C} \approx 3 \cdot 10^2 \text{ Ом}$$

$$Q_{LC} = \frac{\rho_{LC}}{r} = 10^2$$

$$R_{\text{эKB}} = Q_{LC} \rho_{LC} = 3 \cdot 10^4 \text{ Ом}$$

$$f_0 - f_{\text{KB}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\text{KB}}}{C_0 + C_{\text{KB}}} \cdot f_{\text{KB}}. \quad \text{При } C_0 + C_{\text{KB}} = 20 \text{ пФ} \quad \Delta f \approx 135 \text{ Гц}$$

Стабильность частоты генераторов

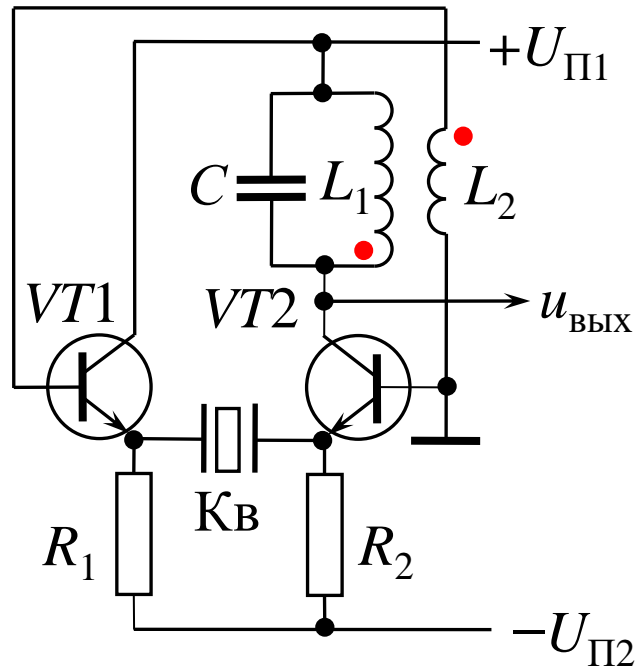
Различают кратковременную нестабильность (определяемую отклонением частоты за время порядка нескольких секунд) и долговременную. Практически пользуются понятиями минутной, часовой, суточной, месячной и годовой нестабильности.

Генераторы с LC-контуром имеют долговременную стабильность до 10^{-4} и кратковременной стабильностью лучше 10^{-5} .

Кварцевые генераторы имеют долговременную стабильностью $\approx 10^{-6}$ и кратковременной стабильностью лучше 10^{-10} .

Наивысшей стабильностью частоты обладают **квантовые стандарты частоты**, имеющие долговременную стабильности $\approx 10^{-13} - 10^{-14}$ и кратковременную стабильность лучше 10^{-15} . В рекордных образцах квантовых стандартах частоты достигнута стабильность частоты $\approx 10^{-17}$.

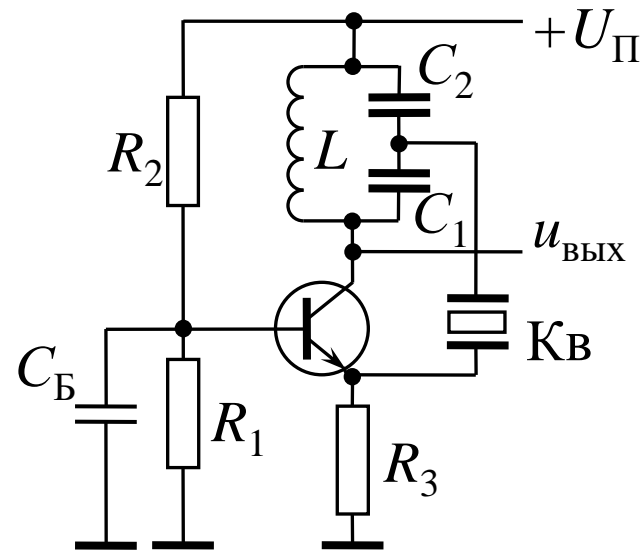
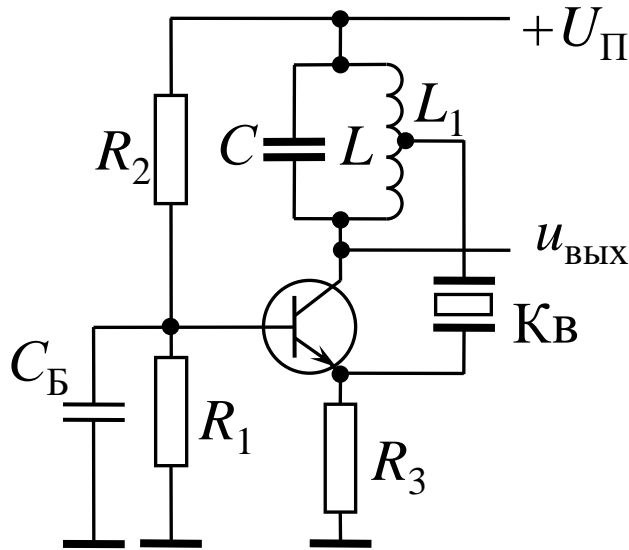
Генераторы с кварцевой стабилизацией частоты



$$K = \frac{r_{\text{э}}}{2r_{\text{э}} + r_{\text{КБ}}} SR_{\text{ЭКБ}} \quad \beta = k_{\text{св}} \cdot (w_2 / w_1)$$

$$k_{\text{св}} \cdot \frac{w_2}{w_1} > \frac{1}{SR_{\text{ЭКБ}}} \left(2 + \frac{r_{\text{КБ}}}{r_{\text{э}}} \right)$$

Трехточечные кварцевые генераторы



$$K = SR_{\text{ЭКВ}}, \quad R_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ЭКВ}0} \left\| \frac{r_{\text{э}} + r_{\text{KB}}}{p^2}, \quad p = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

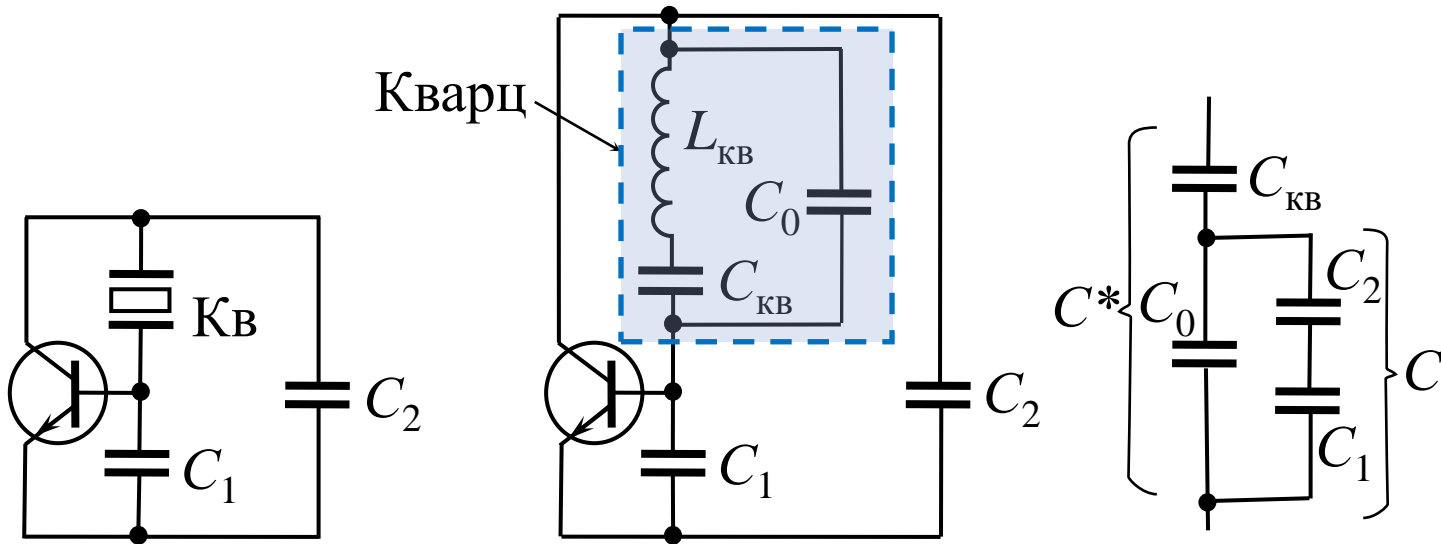
$$\beta = \frac{w_1}{w} \cdot \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{э}} + r_{\text{KB}}}$$

$$\beta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{э}} + r_{\text{KB}}}$$

$$\frac{w_1}{w} > \frac{1}{SR_{\text{ЭКВ}}} \left(1 + \frac{r_{\text{KB}}}{r_{\text{э}}} \right)$$

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} > \frac{1}{SR_{\text{ЭКВ}}} \left(1 + \frac{r_{\text{KB}}}{r_{\text{э}}} \right)$$

Генераторы с использованием параллельного резонанса кварца



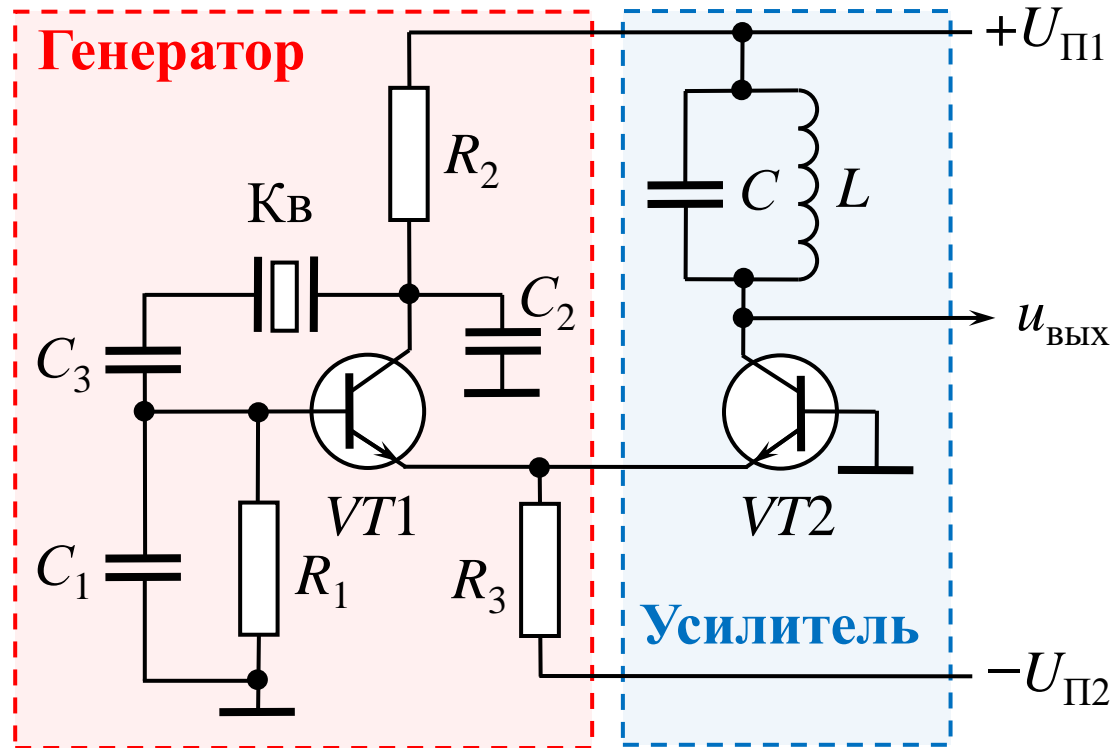
$$\beta = C_2 / C_1 \quad K = S \rho_{KB} Q_{KB} p^2 \quad p = (C^* / C_2)$$

$$C^* = C_{KB} C / (C_{KB} + C) \quad C = (C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)) + C_0$$

$$C_{KB} \ll C \quad C^* \approx C_{KB} \quad p \approx C_{KB} / C_2$$

$$K \approx S \rho_{KB} Q_{KB} \left(\frac{C_{KB}}{C_2} \right)^2 \quad K\beta = S \rho_{KB} Q_{KB} \left(\frac{C_{KB}}{C_2} \right)^2 \cdot \frac{C_2}{C_1} = S \rho_{KB} Q_{KB} \frac{C_{KB}^2}{C_1 C_2} > 1$$

Генератор на дифференциальном усилителе с параллельным резонансом кварца



$$U_{\text{ВЫХ } N} = \frac{2}{N\pi} I_0 \rho Q.$$